

Publication number CN1402073

Publication date 2003-03-12

Inventor LIU XIANBING (CN); XIE QIUHONG (CN); WANG HONGQI (CN)

Applicant FENGHUO COMM SCI & TECH CO LTD (CN)

Classification

- international G02F1 39; H04B10 12; G02F1 35; H04B10 12; (IPC1-7): G02F1 39; H04B10 12

- European

Application number CN20021039059 20020916

Priority number(s) CN20021039059 20020916

Abstract of CN1402073

A distributed Raman amplification subsystem for configuring and automatically controlling the pump power on network management interface and its devices are disclosed. The pump power values needed by different optical fibres under different Raman gains are preset in the subsystem. The actual output power of each pump laser is indirectly measured and then compared with the given value by a feedback-ring controller in order to regulate its output power for meeting requirement.



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 02139059.2

[43] 公开日 2003 年 3 月 12 日

[11] 公开号 CN 1402073A

[22] 申请日 2002.9.16 [21] 申请号 02139059.2

[71] 申请人 烽火通信科技股份有限公司

地址 430074 湖北省武汉市洪山区邮科院路
88 号烽火通信技术部[72] 发明人 刘贤炳 谢秋红 王红启 郭正钧
杨 铸 杨 壮

[74] 专利代理机构 武汉开元专利代理有限责任公

司

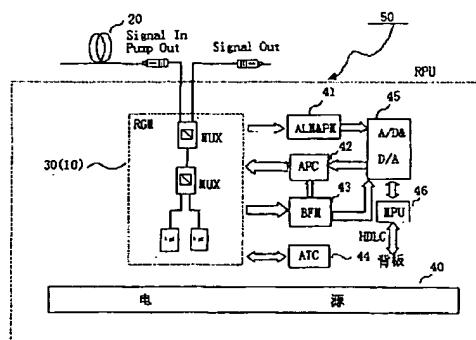
代理人 刘志菊

权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 4 页

[54] 发明名称 分布喇曼放大子系统及其装置

[57] 摘要

本发明提供一种分布喇曼放大子系统及其装置，对泵浦功率进行配置和自动控制是将各种光纤、各种喇曼增益下所需的泵浦功率预置在子系统中，实际应用时，根据线路光纤种类和所需喇曼放大增益的不同，在网管界面上进行配置。具体是对每个泵浦激光器的输出光功率进行间接检测，并采集检测到的值，利用一个包括微处理器的反馈环控制电路，将采集值与给定值进行比较，反馈环控制电路根据设定的允许差值进行调节，直到达到要求，实现对多个激光器的输出功率进行配置和自动控制。具体配置方式有三种，即人工调节方式、网管配置方式和网管连续调节方式。



1、一种分布喇曼放大子系统，包括对泵浦功率的控制，其特征是将各种光纤、各种喇曼增益下所需的泵浦功率预置在子系统中，实际应用时，根据线路光纤种类和所需喇曼放大增益的不同，在网管界面上进行配置。

2、根据权利要求 1 所述的分布喇曼放大子系统，其特征是子系统对各泵浦激光器的输出光功率进行间接检测，采集检测到的值，利用一个包括微处理器的反馈环控制电路，将采集值与给定值进行比较，反馈环控制电路根据设定的允许差值调节激光器的驱动电流，直到达到要求，实现对多个激光器的输出功率进行配置和自动控制。

3、根据权利要求 1 或 2 所述的分布喇曼放大子系统，其特征是每个泵浦激光器的功率控制与配置是通过检测泵浦激光器的背光输出功率作为反馈控制信号，经过消截距与斜率补偿处理，得到泵浦输出功率的采集值。

4、根据权利要求 1 或 2 所述的分布喇曼放大子系统，其特征是具体配置方式是网管配置方式，根据光纤种类和喇曼放大增益的不同将喇曼泵浦的配置分成若干个工作模式，每个模式对应一种特定的光纤和某个特定的喇曼增益值，也对应一组喇曼泵浦激光器的功率值，这些功率值通过实验测量而来，保存在高功率泵浦单元中的存储器 ROM 中，工程开通时只需根据用户光纤的种类和系统所需喇曼增益的大小，在网管界面上点击一下相应的工作模式，就能自动实现所要求的喇曼增益和增益平坦度。

5、根据权利要求 1 或 2 所述的分布喇曼放大子系统，其特征是配置方式可以是网管连续调节方式，网管连续调节方式在网管界面上输入的是每个泵浦激光器的具体功率值，是通过网管界面连续调节各个泵浦激光器的输出功率，它与激光器的实际输出功率应该是相同的。

6、根据权利要求 1 所述的分布喇曼放大子系统，其特征配置方式还可以是人工调节方式，是指手工调节喇曼增益模块中各个泵浦激光器的驱动电流，使它们输出的光功率达到所需要的值，或使喇曼放大器达到所需的增益和增益平坦度

7、一种分布喇曼放大子系统的装置，包括高功率泵浦单元和传输光

纤两部分，其特征是高功率泵浦单元主要包括电源、喇曼增益模块 RGM 及其外围电路、微处理单元 MPU 及其接口部分，喇曼增益模块 RGM 由泵浦激光器及其驱动电路、各种无源光器件、PIN 探测器构成，一般以模块形式封装，对外提供电接口和光接口，喇曼增益模块 RGM 电接口输出的数据送到 RGM 的外围电路 ALM&PM、BFM、ATC。ALM&PM 中的性能数据经 A/D 转换电路变换后，通过其数据总线与 MPU 的数据总线相连，ALM&PM 中的告警数据可以连到 MPU 的 I/O 口，APC 电路一方面接收来自 BFM 的数据，另一方面接收来自微处理单元 MPU 送出并经过 D/A 转换后的数据，经过其内部电路变换后与喇曼增益模块 RGM 的控制端子相连，为 RGM 提供驱动。BFM 经过消截距和斜率补偿处理、A/D 变换后接到微处理单元 MPU 的数据总线。微处理单元 MPU 通过其串口数据总线、时钟线和地址线与背板相连，与网管之间进行数据和控制信息的交换，ATC 电路对泵浦激光器的温度进行自动控制。

分布喇曼放大子系统及其装置

技术领域

本发明涉及一种分布喇曼放大子系统及其装置，用于电信传输领域，尤其涉及需要采用光放大的光纤通信系统，例如高速、长距离或超长距离的密集波分复用（DWDM）系统和高速、单信道的光同步数字网（SDH）。

背景技术

在大容量的光传输系统特别是密集波分复用（DWDM）系统中，光放大器可以说是必不可少的。正是由于掺铒光纤放大器（EDFA）的发明，密集波分复用（DWDM）技术才得以飞速发展。当前，基于 EDFA 光放大技术的密集波分复用（DWDM）系统已遍布全球。然而，EDFA 在对信号提供增益的同时，也将引入噪声，即放大的自发辐射（ASE）噪声，从而劣化系统的性能。通常 EDFA 是一种集总式的光放大装置，使得它的噪声指数受 3dB 量子极限的限制，即噪声指数不可能低于 3dB。在这样的限制下，常规的 DWDM 系统无电再生传输距离只有几百公里。

为了实现超高速、高信道数、超长距离 DWDM 光传输，急需一种既能提供增益、又不产生太大噪声的光放大器。分布的喇曼光纤放大器正好能够满足这样的要求，由于其固有的分布放大特性，这种放大器的等效噪声指数可以突破 3dB 量子极限的限制，甚至能够为负值。分布喇曼放大器在系统中的主要作用是显著改善传输线路的光信噪比（OSNR），增加系统的 Q 值富余度。利用这个富余度，我们可以用来：1) 大大延长放大器之间的跨距，目前可达到 250km；2) 延长无电再生距离，利用 Raman-EDFA 混合放大可以实现数千公里、甚至上万公里的无电再生光纤传输；3) 提高接收灵敏度，有利于高比特率信号传输，分布喇曼放大器将是 40Gbit/s 时代最主要的技术之一；4) 降低入纤功率，从而有效地避免光纤的各种非线性效应，这样不仅有利于信号传输，而且有利于减小 WDM 信道间隔，增加信道数，从而提高频谱效率。喇曼放大器还有其他一些特点：①喇曼增益不限于任何特定波长区。随着时间的推移，喇曼放大的应用可以扩充到整个透明带，从 300nm~2000nm，甚至进入可见带。对近期的 DWDM 应用，喇曼增益实际上可用于光纤的 1300~1700nm 低损耗区。而 EDFA 的可用范围在 1525~1620nm，只有将近 100nm 的窗口。②

利用多波长泵浦技术，可以得到宽的增益带宽（~100nm）。③喇曼放大器的拓扑结构设计比 EDFA 简单，因为在传输光纤内就可直接放大光信号，而不需要特别的增益介质。

喇曼放大的物理基础是受激喇曼散射（SRS），这种效应是印度物理学家 C.V.Raman 于 1928 年发现的。在非线性介质中，入射光束 ω_i 与介质原子相互作用的结果，使入射光子发生非弹性散射，失去一部分能量，产生另一个低频光子 ω_s 。失去的能量被介质以分子振动的形式吸收，即演变成光学声子，此过程称为喇曼散射效应。在喇曼散射中，入射光子与散射光子的频率差称为斯托克斯（Stokes）频移，由介质的振动模式决定。当一束泵浦光与一束斯托克斯频移的信号光同时在光纤 20 中传输（同向或反向或双向）时，将会产生受激喇曼散射，泵浦光的一部分能量将转移到信号光，使信号光得到放大，这就是喇曼放大，如图 1、图 2 所示。

研究发现，石英光纤具有很宽的受激喇曼散射（SRS）增益谱，并在 13.2THz 附近有一较宽的主峰，如图 3 所示。如果一个弱信号与一强泵浦光波同时在光纤中传输，并使弱信号波长置于泵浦光的喇曼增益带宽内，弱信号光即可得到放大，这种基于受激喇曼散射机制的光放大器即称为光纤喇曼放大器。图 4 绘出了喇曼放大的能级图，入射的泵浦光子将电子从低能级激励到虚拟的高能级，然后发生受激辐射，将信号放大，电子能级向下跃迁至石英分子的上声子能级，该能级有一定的宽度，起源于石英玻璃的非晶特性，因此石英光纤具有较宽的喇曼增益谱。斯托克斯频移量对应于声子的本征能量，对石英光纤，该频移大约为 13.2THz（在 1550nm 波长~100nm）。由于喇曼放大是一种非谐振式放大，因此只要泵浦选择合适，可以在任何波长获得增益。喇曼放大器的缺点是转换效率低，目前通过两种方法解决，一是选择喇曼增益效率高的光纤（如色散补偿光纤 DCF）作为增益介质；二是利用高输出功率的泵浦源。目前基于二极管激光器的泵浦源发展很快，最新的高功率激光二极管输出功率可在 1W 以上，新的二极管阵列包层泵浦的喇曼光纤激光器输出功率可超过 10W。

随着高功率半导体激光器制造技术的成熟，喇曼放大器已经商用。然而，对于分布喇曼放大器，由于其放大介质是传输光纤，目前喇曼模块的供应商通常只提供多波长的泵浦源，对于如何有效地将它应用于系统，一般不提供解决方案。严格说来，喇曼增益模块还算不上是真正意义上的喇曼放大器，从喇曼增益模块到实用化的分布喇曼光纤放大器，还有很多

工作要做。其中，主要技术难点是设计出一套完善的泵浦功率控制方案，从而在各种不同的应用场合迅速、方便、有效地实现增益平坦，满足 DWDM 系统的要求。

当前，分布喇曼放大技术应用于商用的 DWDM 系统，亟待一个科学、合理的解决方案。这是因为，分布的喇曼放大特性与线路光纤密切相关，随着光纤种类的不同，喇曼增益谱有很大的差异性。在包含喇曼分布放大的 DWDM 系统中，为了实现增益平坦，需要调节线路上每个喇曼泵浦模块中各个泵浦激光器的输出功率。商用的喇曼模块通常包含 4~8 个泵浦激光器，一个长距离的 DWDM 系统含有数个至数十个跨段，可见这项调节工作将是非常烦琐的，而且需要配备多波长信号源和光谱分析仪等测试设备。在实验室完成这样的工作还是可以接受的，如果在工程开通和维护过程中还需要进行这样的调节，则不仅费事费力，大大提高开通和维护成本，而且往往很难有这样的实验条件。

发明内容

本发明的目的是对 DWDM 系统中的分布喇曼放大提供子系统层面上的解决方案，将各种光纤、各种喇曼增益下所需的泵浦功率预置在子系统中，实际应用时，根据线路光纤种类和所需喇曼放大增益的不同，只需在网管界面上进行简单的配置，就能实现平坦的喇曼放大增益，避免了工程开通和维护过程中烦琐的泵浦功率调节问题，使在 DWDM 光传输系统中，光放大器达到一定的增益平坦度，保证接收端各个光信道的光功率和光信噪比满足要求，实现每个信道的无误码传输。

本发明对 DWDM 系统中的分布喇曼放大提供子系统层面上的解决方案，分布喇曼放大子系统对泵浦功率的控制，是将各种光纤、各种喇曼增益下所需的泵浦功率预置在子系统中，实际应用时，根据线路光纤种类和所需喇曼放大增益的不同，在网管界面上进行配置。

所述的分布喇曼放大子系统，是对每个泵浦激光器的输出光功率进行间接检测，并采集检测到的值，利用一个包括微处理器的反馈环控制电路，将采集值与给定值进行比较，反馈环控制电路根据设定的允许差值进行调节，直到达到要求，实现对多个激光器的输出功率进行配置和自动控制。

所述的分布喇曼放大子系统，具体配置方式是网管配置方式，根据光纤种类和喇曼放大增益的不同将喇曼泵浦的配置分成若干个工作模式，每

个模式对应一种特定的光纤和某个特定的喇曼增益值，也对应一组喇曼泵浦激光器的功率值，这些值通过实验测量而来，保存在高功率泵浦单元中的存贮器 ROM 中，工程开通时只需根据用户光纤的种类和系统所需喇曼增益的大小，在网管界面上点击一下相应的工作模式，就能自动实现所要求的喇曼增益和增益平坦度。

所述的分布喇曼放大子系统，配置方式可以是网管连续调节方式，网管连续调节方式在网管界面上输入的是每个泵浦激光器的具体功率值，是通过网管界面连续调节各个泵浦激光器的输出功率，它与激光器的实际输出功率应该是相同的。

所述的分布喇曼放大子系统，配置方式还可以是人工调节方式，是指手工调节喇曼增益模块中各个泵浦激光器的驱动电流，使它们输出的光功率达到所需要的值，或使喇曼放大器达到所需的增益和增益平坦度。

分布喇曼放大子系统的装置包括高功率泵浦单元和传输光纤两部分，其特征是高功率泵浦单元主要包括电源、喇曼增益模块 RGM 及其外围电路、微处理单元 MPU 及其接口部分，喇曼增益模块 RGM 由泵浦激光器及其驱动电路、各种无源光器件、PIN 探测器构成，一般以模块形式封装，对外提供电接口和光接口，喇曼增益模块 RGM 电接口输出的数据送到 RGM 的外围电路 ALM&PM、BFM、ATC。ALM&PM 中的性能数据经 A/D 转换电路变换后，通过其数据总线与 MPU 的数据总线相连，ALM&PM 中的告警数据可以直接连到 MPU 的 I/O 口，APC 电路一方面接收来自 BFM 的数据，另一方面接收来自微处理单元 MPU 送出并经过 D/A 转换后的数据，经过其内部电路变换后与喇曼增益模块 RGM 的控制端子相连，为 RGM 提供驱动。BFM 经过消截距和斜率补偿处理、A/D 变换后接到微处理单元 MPU 的数据总线。微处理单元 MPU 通过其串口数据总线、时钟线和地址线与背板相连，与网管之间进行数据和控制信息的交换，ATC 电路对泵浦激光器的温度进行自动控制。

本发明的优点是提供一种配置灵活、实用的分布喇曼放大子系统技术方案，具有如下特点：

① 实用、多样化的泵浦功率控制方式，便于喇曼放大器的系统应用。

人工调节方式，使喇曼放大器在网管、微处理单元失效的情况下仍能提供平坦的增益；

网管配置方式，针对不同的增益和不同类型的光纤预置有 9 种工作

模式，将来还可根据需要进行扩充；

网管连续调节方式，在一定范围内，通过网管可以随意调节各个泵浦激光器的输出功率，从而实现所需要的喇曼增益和增益平坦度。利用这种方式，可以在一定程度上补偿因 EDFA 级联引起的增益不平坦。

② 对光纤没有特殊要求，可适用于各种类型、不同厂家的石英光纤，如标准单模光纤（NDSF）、色散位移光纤（DSF）、非零色散位移光纤（NZ-DSF）、色散补偿光纤（DCF）等；

③ 喇曼增益高，对标准单模光纤（NDSF），开关增益可大于 10dB；

对

DCF 光纤，喇曼增益可达到 20dB 以上。

④ 增益平坦度高，对 C 波段，增益平坦度接近 1dB；对 C+L 波段，增

益平坦度可控制在 1.5dB 以内；

⑤ 噪声低，等效噪声指数接近 0dB。

⑥ 具有泵浦自动关断功能，当高功率泵浦单元前面的光纤断裂或连接头松

脱时，泵浦瞬间自动关断，从而保护现场人员和设备的安全。

⑦ 对高功率泵浦单元自身提供性能监测和告警功能；

⑧ 对输入的光信号进行功率监测。

附图说明

图 1 是喇曼散射示意图；

图 2 是喇曼放大的基本原理示意图；

图 3 是石英光纤喇曼放大的增益谱图；

图 4 是石英光纤喇曼放大的能级图；

图 5 是分布喇曼放大器（DRA）在 DWDM 系统中的应用框图；

图 6 是本发明所述的喇曼放大子系统装置的框图；

图 7 是本发明所述的软件流程图。

具体实施方式

分布喇曼光纤放大器不同于常规的 EDFA，其结构是开放式的，因为放大器中的核心部件—增益介质（传输光纤或色散补偿光纤 DCF）通常要向外延伸数十公里。因此，一个分布喇曼放大子系统包括高功率泵浦单元 50 和传输光纤 20 两部分，传输光纤除了传输信号之外，也充当增益介质。增益介质如果采用 DCF，则这样的喇曼放大器还具有色散补偿的功能。

由于放大器的增益介质是普通的传输光纤，因此放大器不仅不能对光

纤提出任何特殊要求，相反，还要能适应各种各样的光纤类型。即使是同一类光纤，如 G.652 光纤，不同厂家售出的产品，喇曼放大特性也略有不同，放大器应具有抵抗这种差异的能力。

本发明公开的喇曼放大子系统，完全满足上面所述的要求，关键在于其中的高功率喇曼泵浦单元 (RPU)。该 RPU 采用了专门的背光监测反馈环 (BFM Feedback Loop) 技术，不仅性能稳定、配置灵活，能够适应任意种类的石英光纤，而且具备安全防护功能。

图 6 示出了本发明的一个实施案例，喇曼放大子系统由高功率喇曼泵浦单元 (RPU) 50 和传输光纤 20 组成，其中高功率喇曼泵浦单元 50 包括硬件电路和控制软件两个部分。

硬件电路包含：

① 电源 40：为整个单元提供直流供电电压。
② 喇曼增益模块 (RGM) 30：单元中最重要的元件，由泵浦激光器及其驱动电路、各种无源光器件、PIN 探测器等部分构成。一般以模块形式封装，对外提供电接口和光接口。

③ 喇曼增益模块 (RGM) 的外围电路：为 RGM 提供驱动、自动功率控制 (APC) 42 和自动温度控制 (ATC) 44 等，并对 RGM 的性能和告警信息(ALM&PM)41 进行处理，上报网管。

④ 微处理单元 (MPU) 及其接口：MPU 是基于单片微型计算机的控制单元，其主要功能除了采集高功率喇曼泵浦单元的告警、性能等信息上报给网元管理单元 (EMU) 之外，一个重要功能是实现泵浦单元的自动控制，它是该单元的控制中心，主要用来控制 RGM 中各个泵浦激光器的输出功率，必要时关断泵浦，其控制规程通过软件实现。MPU 还有一个功能是提供 DEBUG 调试口，便于泵浦单元的调试。

每个泵浦激光器的功率控制与配置通过背光监测反馈环检测泵浦激光器的背光输出功率作为反馈控制信号，经过消截距与斜率补偿处理，得到泵浦输出功率的采集值，作为对泵浦输出功率配置和控制的依据，利用一个包括微处理器的反馈环控制电路，对多个激光器的输出功率进行配置和自动控制。微处理单元对泵浦输出功率的配置和控制，仍然通过调节泵浦激光器的驱动电流来实现。

方案包括下面将要详细描述的三种泵浦功率调节方式，即人工调节方式、网管配置方式和网管连续调节方式，在系统应用中可以根据需要采用其中的任意一种。

人工调节方式是指手工调节喇曼增益模块中各个泵浦激光器的驱动电

流，使它们输出的光功率达到所需要的值，或使喇曼放大器达到所需的增益和增益平坦度。这种方式不需要网管，甚至不需要微处理单元（MPU），特别适合在实验室里研究喇曼放大效应。尽管人工调节方式不大适合系统的现场使用，但也是系统制造商所需要的。利用这种泵浦调节方式，可以摸索出各种各样光纤的喇曼放大效应，从而摸索出一套最佳参数配置，为下面的网管配置方式提供依据。

网管配置方式是根据光纤种类和喇曼放大增益的不同将喇曼泵浦的配置分成若干个工作模式，每个模式对应一种特定的光纤和某个特定的喇曼增益值。例如，模式 1 代表传输光纤为 Corning 公司的 SMF28，系统要求的喇曼开关增益为 8dB；模式 2 代表传输光纤为烽火通信科技股份有限公司的 G.652 纤，系统要求的喇曼开关增益为 10dB；等等。工程开通时，只需根据用户光纤的种类和系统所需喇曼增益的大小，在网管界面上点击一下相应的工作模式，就能自动实现所要求的喇曼增益和增益平坦度。本发明公开的喇曼放大子系统已经预置 9 种工作模式，今后还可根据需要无限扩充。每个工作模式对应一组喇曼泵浦激光器的功率值，这些值通过实验测量而来，保存在高功率泵浦单元的存贮器（ROM）中，每个泵浦激光器的功率控制与配置通过背光监测反馈环技术实现。

网管连续调节方式就是通过网管界面连续调节各个泵浦激光器的输出功率，这种方式与第一种方式有点相似，不同的是该方式是在网管界面上调节功率，而人工调节方式必须直接在高功率泵浦单元上操作。还有一点重要的不同，网管连续调节方式在网管界面上输入的是每个泵浦激光器的具体功率值，它与激光器的实际输出功率应该是相同的，而人工调节方式必须配有仪表进行监测。在网管正常工作的情形下，网管连续调节方式可以代替人工调节方式对喇曼放大器的增益和增益平坦度进行调整。当第二种方式即网管配置方式的几种工作模式都不能满足工程实际需要时，采用网管连续调节方式也能达到工程开通的目的。该方式还有一个很重要的用途，系统中 EDFA 级联容易造成 DWDM 信号的增益不平坦，此时，可以采用网管连续调节方式进行细调，通过调节喇曼增益谱使 DWDM 信号的增益平坦度在一定程度上得到改善。

图 7 是本发明所述的泵浦功率控制软件流程图。控制软件主要负责对采集的数据进行处理、实施高功率泵浦单元的自动控制，另外还负责与 EMU 之间通过高级数据链路控制协议（HDLC）进行通信。

泵浦功率的控制规程如下：

MPU 接收来自网管的指令，如果是连续调节方式，则根据接收到的

一组泵浦功率值计算出各个泵浦激光器驱动电流的初始值和 P 点的参考值 P2，下载计算出的驱动电流初始值到各个泵浦激光器。监测 P 点的采集值 P1，并将 P1 同 P2 比较，如果 P1 比 P2 大两个单位以上，则将驱动电流下调一个单位；如果 P1 比 P2 小两个单位以上，则将驱动电流上调一个单位；如果 P1 与 P2 之间的差值在两个单位以内，则对驱动电流不作调整。这样的过程继续进行下去，直到 MPU 接收到网管新的指令。MPU 接收来自网管的指令，如果是网管配置方式，则根据接收到的工作模式的代码，从高功率泵浦单元的存贮器 ROM 中读出各个泵浦激光器驱动电流的初始值和 P 点的参考值 P2，下载驱动电流初始值到各个泵浦激光器。监测 P 点的采集值 P1，并将 P1 同 P2 比较，如果 P1 比 P2 大两个单位以上，则将驱动电流下调一个单位；如果 P1 比 P2 小两个单位以上，则将驱动电流上调一个单位；如果 P1 与 P2 之间的差值在两个单位以内，则对驱动电流不作调整。这样的过程继续进行下去，直到 MPU 接收到网管新的指令。

本发明公开的喇曼放大子系统主要应用于以下场合：

- ① 常规 $N \times 2.5\text{Gb/s}$ 、 $N \times 10\text{Gb/s}$ ($N=4,8,16,\dots,40$) DWDM 系统特殊线路配置；
- ② 作为 $160 \times 10\text{Gb/s}$ DWDM 系统的可选部件；
- ③ 超长距离 DWDM 系统所必需；
- ④ 10 Gb/s 、 40 Gb/s SDH 系统。

在 DWDM 系统中，分布喇曼放大器 (DRA) 通常结合 EDFA 使用，放在每个跨段的接收侧，用来提高 DWDM 信号的光信噪比。典型的系统应用框图如图 5 所示：TX 是发射机、MUX 是波分复用器、EDFA 是掺铒光纤放大器、DRA 是分布喇曼放大器、DEMUX 是解复用器、RX 是接收机。

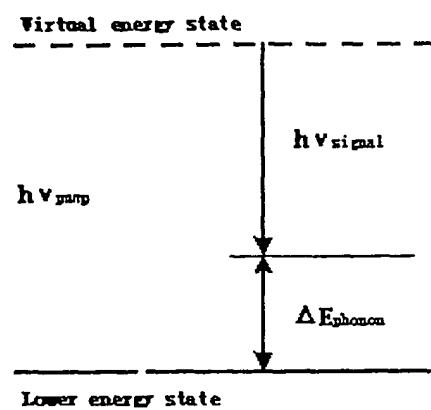


图 4

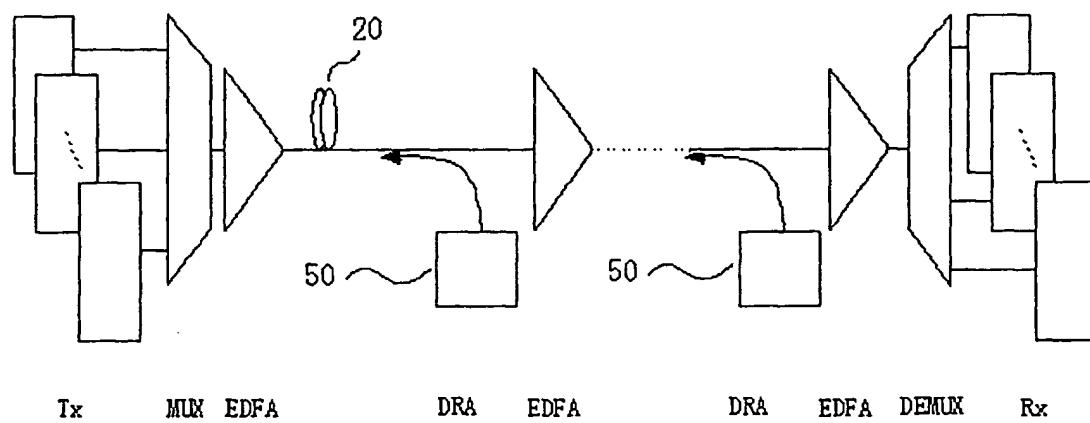


图 5

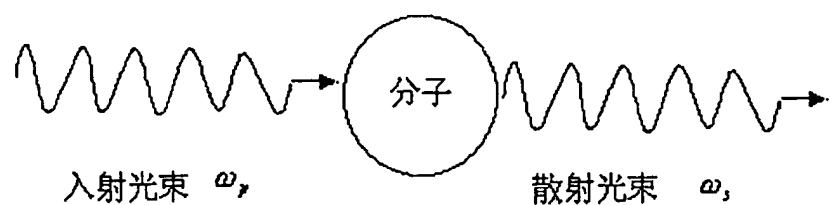


图1

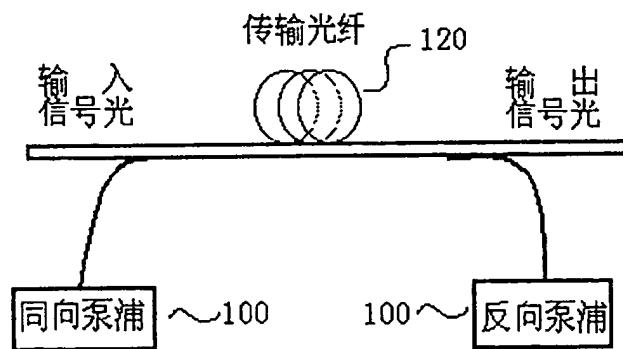


图2

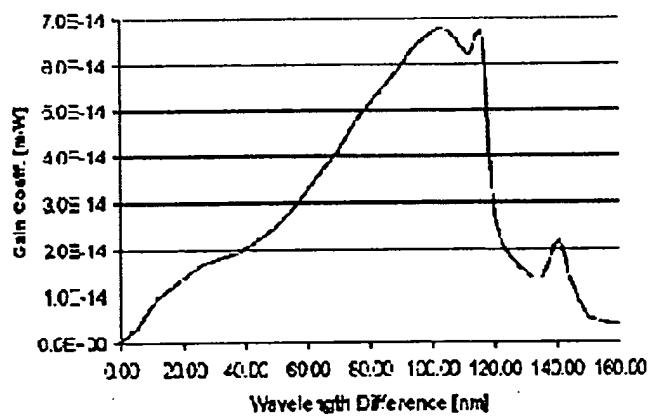


图3

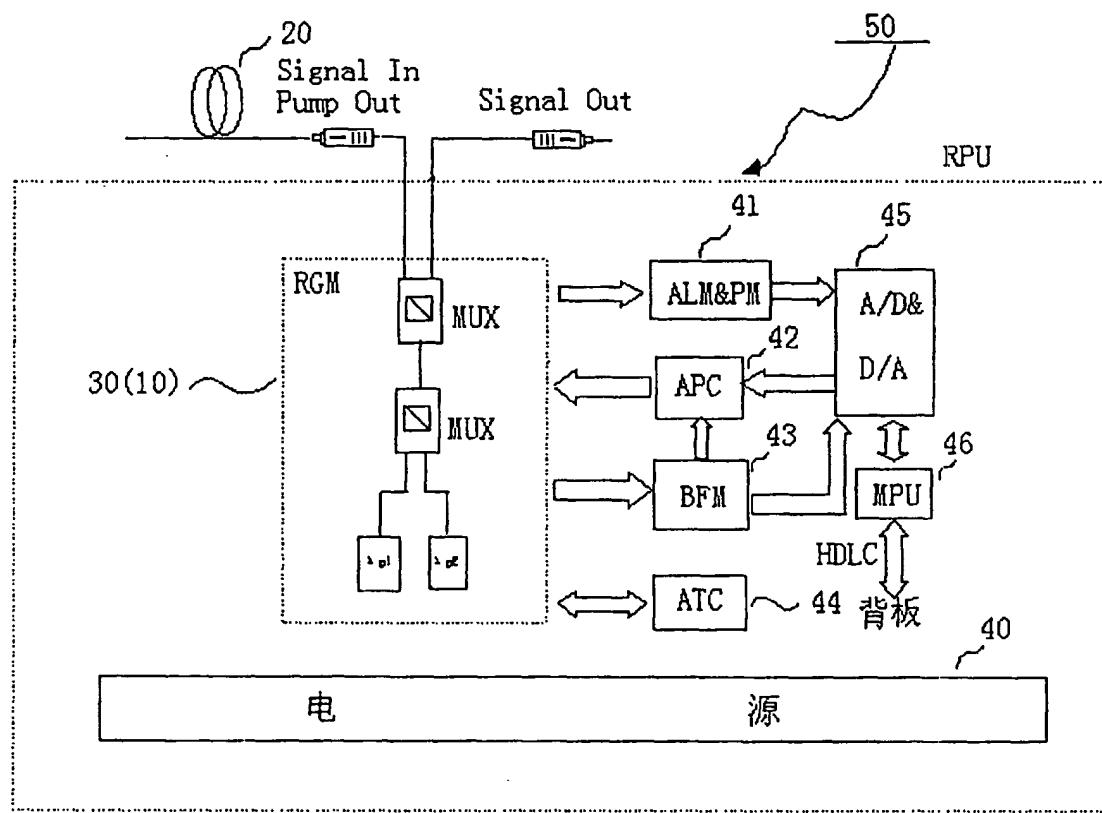


图 6

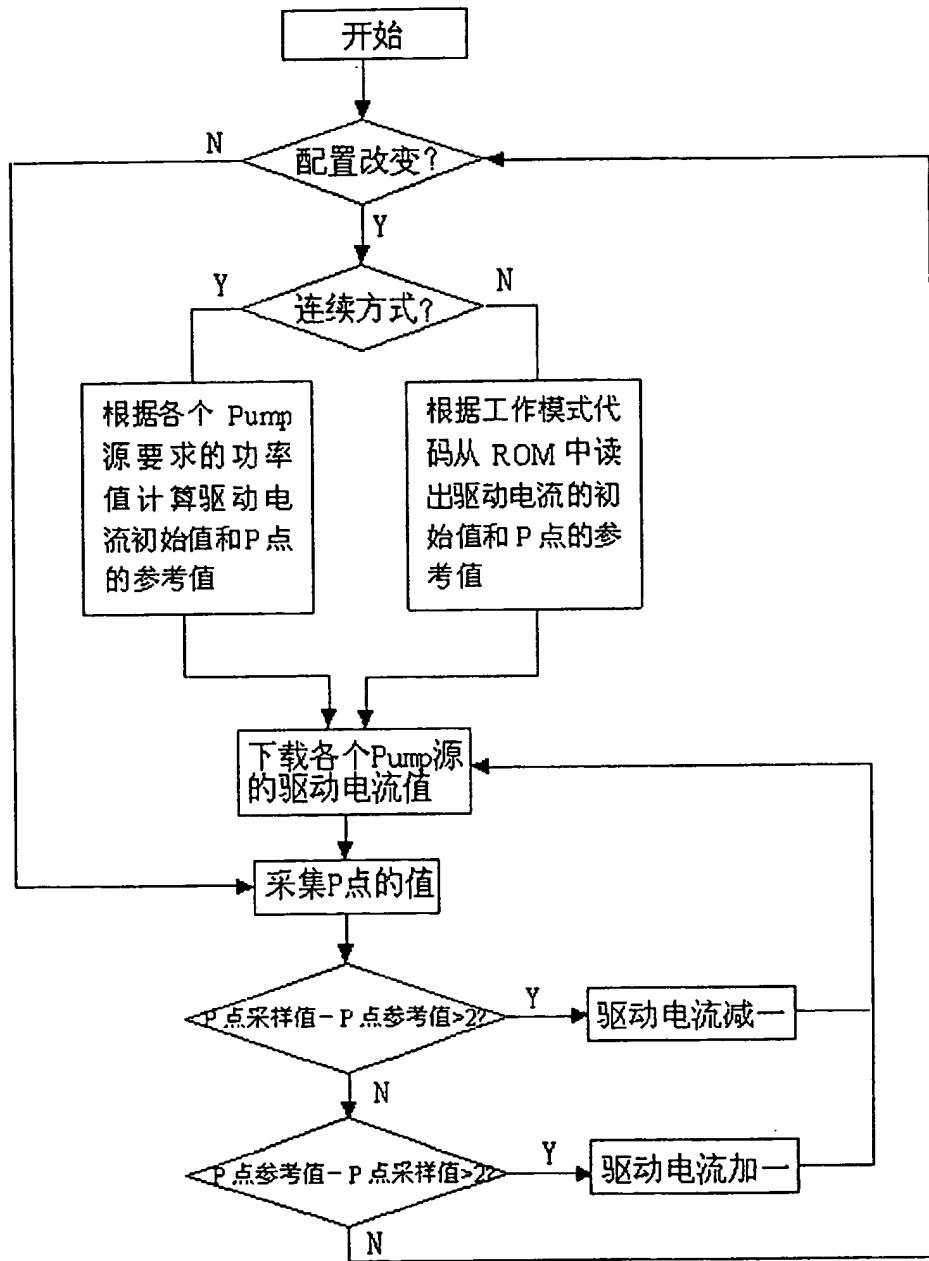


图 7